

Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA (1998-2003)

Ensayos de Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* Por Seis Métodos No Destructivos

Ing. Agr. OF Alvaro Pérez del Castillo
Ing. Quim. Raúl de Castro
Dr. Sadaaki Ohta

Colaboradores:
Ing. Quim. Silvia Böthig, Per. Agr. Hugo O'Neill,
Sr. Dilvar Silva, Sr. Luciano Benites, Sr. Javier Doldán

Informe de Investigación N°1
Mayo 2000



PRÓLOGO

El presente trabajo da inicio a la serie: "Informes de Investigación", que reunirá estudios realizados como parte del "Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales" entre el Sector Productos Forestales del LATU y JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón) en Montevideo, Uruguay desde 1998 hasta 2003.

Con esta serie el LATU pretende la difusión tecnológica como una contribución al desarrollo de la industria forestal.

Los autores agradecen al Sr. Toshinari Tanaka (Director del Sector de Características de la Madera, Forestry and Forest Products Research Institute, TSUKUBA, Japón) quien fue enviado por JICA como experto de corto plazo en ensayos no-destructivos y al Sr. Harushi Kobayashi (Coordinador del proyecto) por su invaluable apoyo en este estudio.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	2
2.1. CORRELACIÓN ENTRE MOE Y MOR	2
2.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE MADERA JUVENIL Y ADULTA	2
2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS 6 MÉTODOS NO-DESTRUCTIVOS UTILIZADOS	6
2.3.1. <u>Flexión estática con pesas</u>	6
2.3.2. <u>Vibración Longitudinal</u>	6
2.3.3. <u>Vibración Transversal</u>	7
2.3.4. <u>Fakopp</u>	8
2.3.5. <u>Sylvatest</u>	9
2.3.6. <u>Pundit</u>	10
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	12
3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD	12
3.2. COMPARACIÓN DE LOS 6 DIFERENTES MÉTODOS NO-DESTRUCTIVOS	13
3.3. RELACIÓN ENTRE EL MOE Y LA DENSIDAD	17
3.4. MOE DE MADERA JUVENIL Y MADERA ADULTA	18
3.4.1. <u>Variación del MOE desde médula a corteza</u>	18
3.4.2. <u>Variación del MOE entre los 9 árboles ensayados</u>	19
4. <u>CLASIFICACIÓN DE P. TAEDA BASADA EN EL MOE SEGÚN NORMAS JAS</u>	20
5. <u>CONCLUSIONES</u>	21
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	22
7. <u>ANEXO</u>	23

ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE *PINUS TAEDA* POR SEIS MÉTODOS NO-DESTRUCTIVOS

RESUMEN

La posibilidad de aplicación de seis métodos no-destructivos para estimación del módulo de elasticidad (MOE) en flexión fue estudiada en tablas de *Pinus taeda* de rápido crecimiento cultivados en Uruguay.

1. INTRODUCCIÓN.

Tanto en Uruguay como en otros países, el *Pinus taeda* es una de las especies de rápido crecimiento más cultivadas y su madera es utilizada para diferentes usos finales. Dentro de estos usos finales la madera para construcción es quizás el más importante. La madera uruguaya de *Pinus taeda* ha sido utilizada con diferentes propósitos. No obstante, la investigación en la clasificación de la calidad de la madera aserrada por sus propiedades mecánicas no ha sido suficiente aún. La madera aserrada de *Pinus taeda* debe ser resistente y duradera para ser utilizada en la construcción. Uno de los objetivos de este trabajo es conocer y categorizar la madera de *Pinus taeda* por su resistencia mecánica.

Para la adecuada utilización de la madera aserrada con fines estructurales, es muy importante desarrollar y establecer métodos para evaluar las propiedades mecánicas de la madera. Es necesario que estos métodos sean confiables, racionales y rápidos, lo que ocurre con los métodos no-destructivos.

Existen muchos métodos para poder estimar la resistencia de la madera a través de varios parámetros no-destructivos (Nakai T. y Tanaka T.,1989; Nagao H. et al,1991). Uno de los parámetros más utilizados es el módulo de elasticidad (MOE), el cual se puede obtener a través del método de “cargas muertas” o flexión estática con pesas. El MOE calculado a partir de este método tiene una muy alta correlación con el módulo de rotura en flexión (MOR)(Komatsu K., Nakai T.; Wood Handbook, USDA,1999).

Es por eso que se han investigado métodos factibles y prácticos para medir y estimar el módulo de elasticidad en aserraderos o depósitos de madera. Por consiguiente, se realizó una comparación entre varios métodos no-destructivos. Los valores de módulo de elasticidad fueron obtenidos mediante seis métodos diferentes:

- ⇒ Flexión estática con pesas.
- ⇒ FFT Analyzer (Frecuencia de vibración longitudinal).
- ⇒ FFT Analyzer (Frecuencia de vibración transversal).
- ⇒ PUNDIT (Tiempo de propagación de onda de ultrasonido).
- ⇒ SYLVATEST (Tiempo de propagación de onda de ultrasonido).
- ⇒ FAKOPP (Tiempo de propagación de onda inducida por impacto).

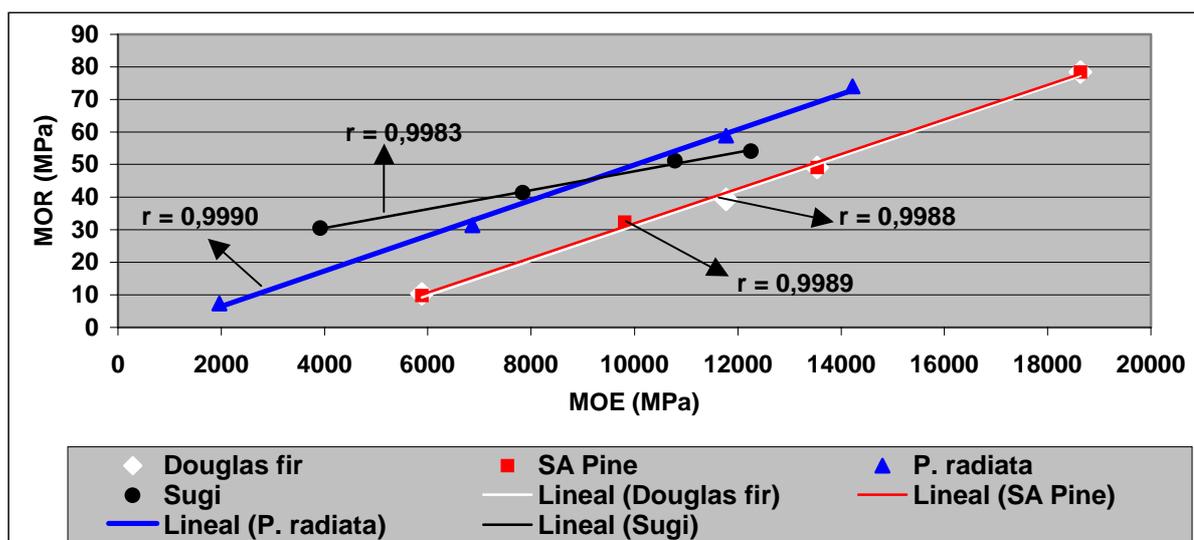
Los métodos de evaluación seleccionados debían de ser simples, rápidos, confiables, no-destructivos y de uso práctico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. CORRELACIÓN ENTRE MOE Y MOR.

Como se dijo anteriormente, uno de los parámetros no-destructivos más utilizados para estimar la resistencia de la madera es el módulo de elasticidad (MOE) y éste tiene una muy alta correlación con la flexión estática (módulo de ruptura en flexión, MOR).

A modo de ejemplo se puede observar en la gráfica N°1, la correlación que existe entre estos dos parámetros para cuatro especies diferentes, observándose correlaciones muy altas y positivas.



Gráfica N° 1: Correlación entre MOE y MOR

2.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE MADERA JUVENIL Y MADERA ADULTA.

En general la madera juvenil se forma alrededor de la médula y se localiza todo a lo largo del fuste (Fig N°1). Esta se define como el material formado desde la médula hasta un anillo determinado, que según la especie, puede ser entre el 5° y 20° anillo. Por ejemplo, Sugi (*Cryptomeria japonica*) y Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), generan madera juvenil entre 10 y 15 años, representando esto una distancia desde la médula de entre 5 y 6 cm. (Ohta S., Watanabe H., 1968; Matsomuto T. et al., 1964). Estudios en *Pinus radiata* determinaron formación de madera juvenil durante 15 años y la distancia desde la médula fue de 10 cm. (Cown D., 1975; Bamber K. y Burley J., 1983) Distintos índices de calidad de madera de plantaciones de *Pinus taeda* de Uruguay están siendo estudiadas por LATU-JICA, por ejemplo, longitud de traqueidas y densidad básica, para determinar hasta que anillo aproximadamente se produce la formación de madera juvenil. De estos estudios, se observó que la transición entre la madera juvenil y la madera adulta (para los árboles estudiados) ocurre entre los anillos 8 y 12 o sea a una distancia promedio de la médula de entre 11 y 16 centímetros aproximadamente (Gráfica N°2).

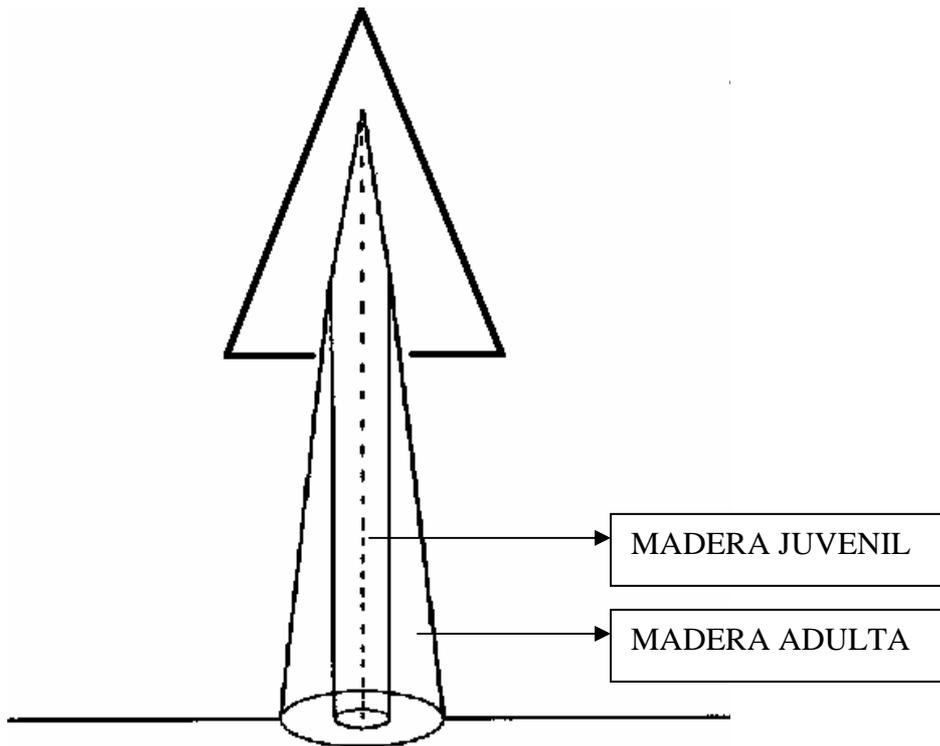
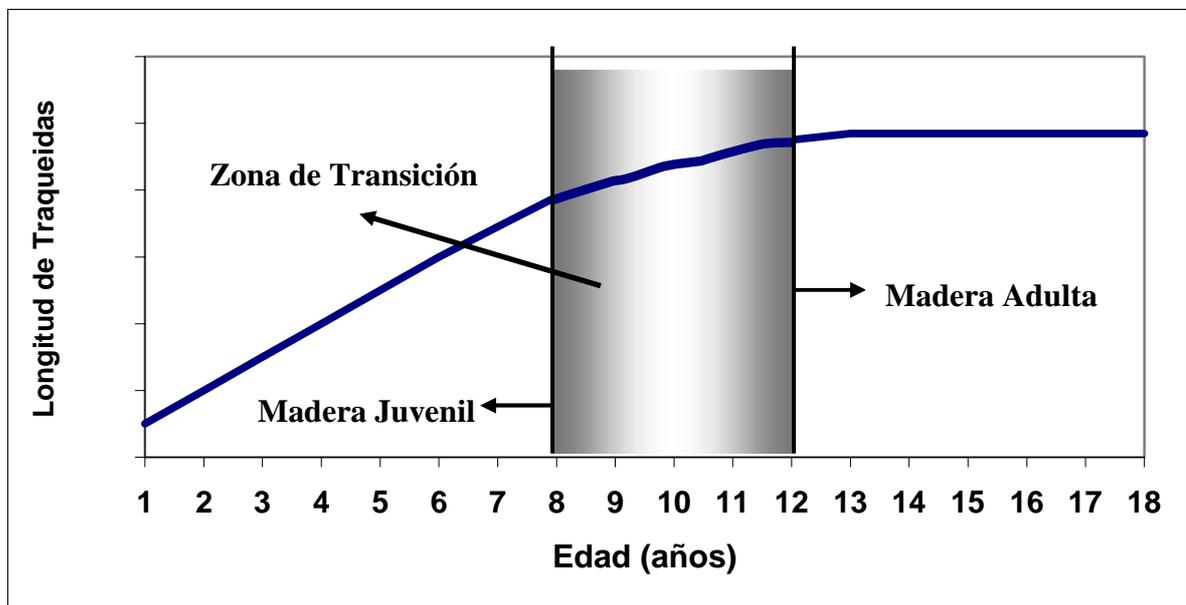


Figura N°1: Esquema de la ubicación de la madera juvenil y adulta en árboles en pie.



Gráfica N° 2: Variación de la longitud de traqueidas con la edad. Transición de madera juvenil a madera adulta.

La madera juvenil presenta importantes diferencias en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas con respecto a la madera adulta.

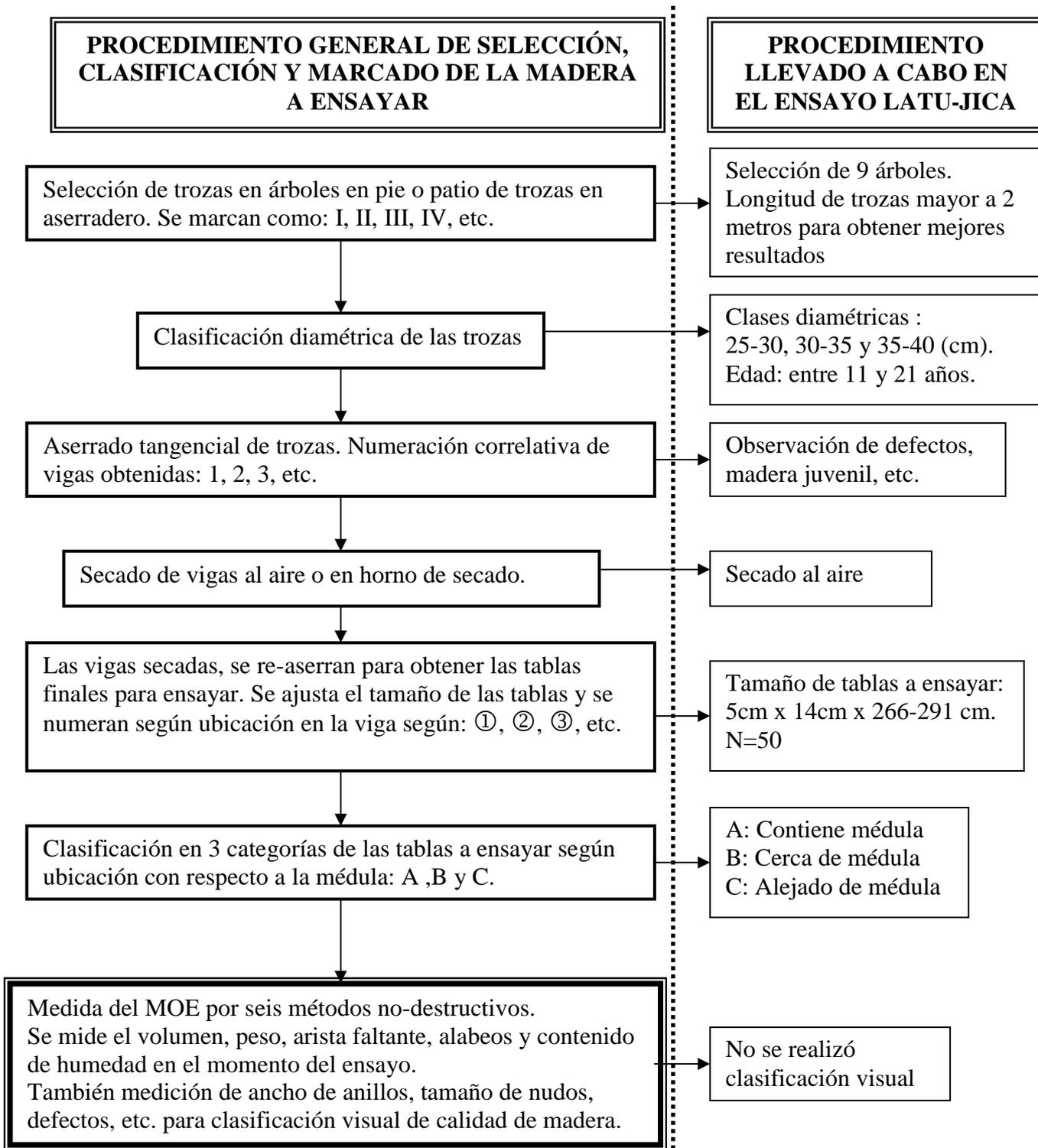
En madera libre de defectos (clear), las propiedades que influyen en el comportamiento mecánico son: ángulo microfibrilar, longitud de fibras, densidad, porcentaje de leño tardío, espesor de pared celular y diámetro de lumen celular. La madera juvenil tiene un ángulo microfibrilar alto (ángulo microfibrilar significa el ángulo que forman la microfibrillas de celulosa con respecto al eje longitudinal de la traqueida, generalmente medido en la pared celular secundaria S2), lo que puede producir una contracción longitudinal 10 veces mayor que el de la madera adulta normal. Tanto la madera de compresión como el grano espiralado también ocurren con más frecuencia en la madera juvenil, lo que también contribuye a una mayor contracción longitudinal (Kojima K. *et al.*, 1963; Ohta S., 1979).

En madera estructural, la relación entre la resistencia de la madera juvenil y madera adulta varía entre 0.5 y 0.9 para módulo de rotura en flexión, 0.5 y 0.95 para la tracción y entre 0.45 y 0.75 para módulo de elasticidad (Wood Handbook, USDA, 1999). La resistencia a la compresión perpendicular al grano, aplicada en dirección radial, varía con el contenido de madera juvenil. Este cambio puede ser hasta 8 veces menor que el sugerido por cambios en la densidad.

La relación madera juvenil / madera adulta es menor para madera de alta calidad (alta resistencia) que para madera de baja calidad, lo que indica que la madera juvenil tiene una importante influencia en la reducción de las propiedades mecánicas de la madera utilizada para la construcción.

Debido a la diferencia que existe entre la madera juvenil y la madera adulta, las tablas a ser ensayadas se clasificaron en tres categorías diferentes: A, B y C. Las tablas categoría A, contenían médula o sea estaban compuestas principalmente por madera juvenil; las categoría B, eran tablas muy cercanas a la médula o sea contenían madera adulta y juvenil; por último las categoría C, eran las alejadas de la médula o sea principalmente madera adulta.

El procedimiento de selección, clasificación y marcado de las tablas se llevó a cabo de la siguiente manera:



Nota: a modo de ejemplo la identificación final de cada tabla fue:

I - 2 - ② - A ⇔ Siendo: I = N° de árbol

2 = N° de viga dentro de troza

② = N° de tabla dentro de viga

A = Ubicación de tabla con respecto a la médula

2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS SEIS MÉTODOS NO-DESTRUCTIVOS UTILIZADOS.

2.3.1. Flexión estática con pesas.

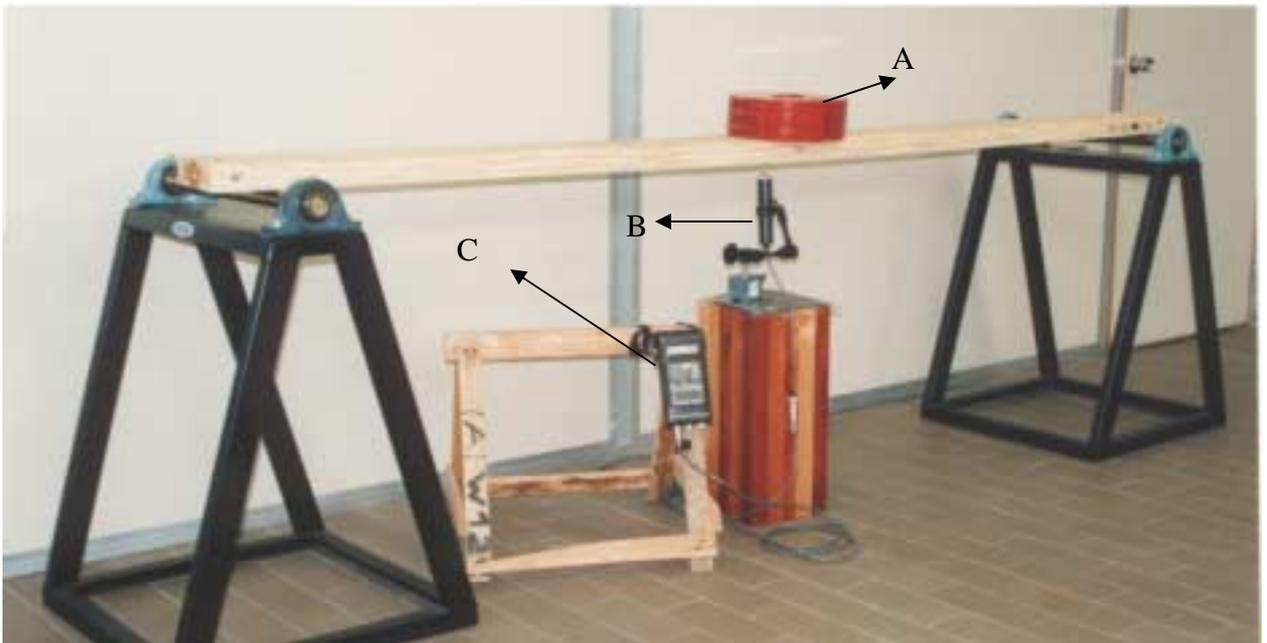


Foto N°1. Donde: A⇒ Pesas, B⇒ Transductor, C⇒ Medidor digital.

Este método permite medir el módulo de elasticidad estático en flexión por carga con pesas. Mediante la aplicación de pesas sobre la tabla en el intervalo elástico y la medición con un transductor de las deformaciones que se producen, se calcula el MOE de la siguiente manera:

$$E_b = (\Delta P * s^3) / (4 * \Delta y * b * h^3)$$

donde:

- E_b = módulo de elasticidad
- ΔP : carga de las pesas
- s : distancia entre los apoyos de la tabla
- Δy : deformación para ΔP
- b : ancho
- h : altura

2.3.2. Vibración Longitudinal.

Este método utiliza un equipo denominado FFT Analyzer, que es un analizador de sonido conectado a un micrófono, donde se mide la frecuencia principal de vibración. Este equipo es de origen japonés, fabricado por la empresa AND Company, Limited.

Para realizar el ensayo se coloca la tabla apoyada sobre dos trozos de poliuretano blando para que pueda vibrar libremente. Se golpea con un martillo la cara de un extremo de la tabla y con el micrófono colocado a 5 cm de la otra cara se capta el sonido producido por la vibración longitudinal. El equipo entrega instantáneamente la frecuencia principal de vibración.

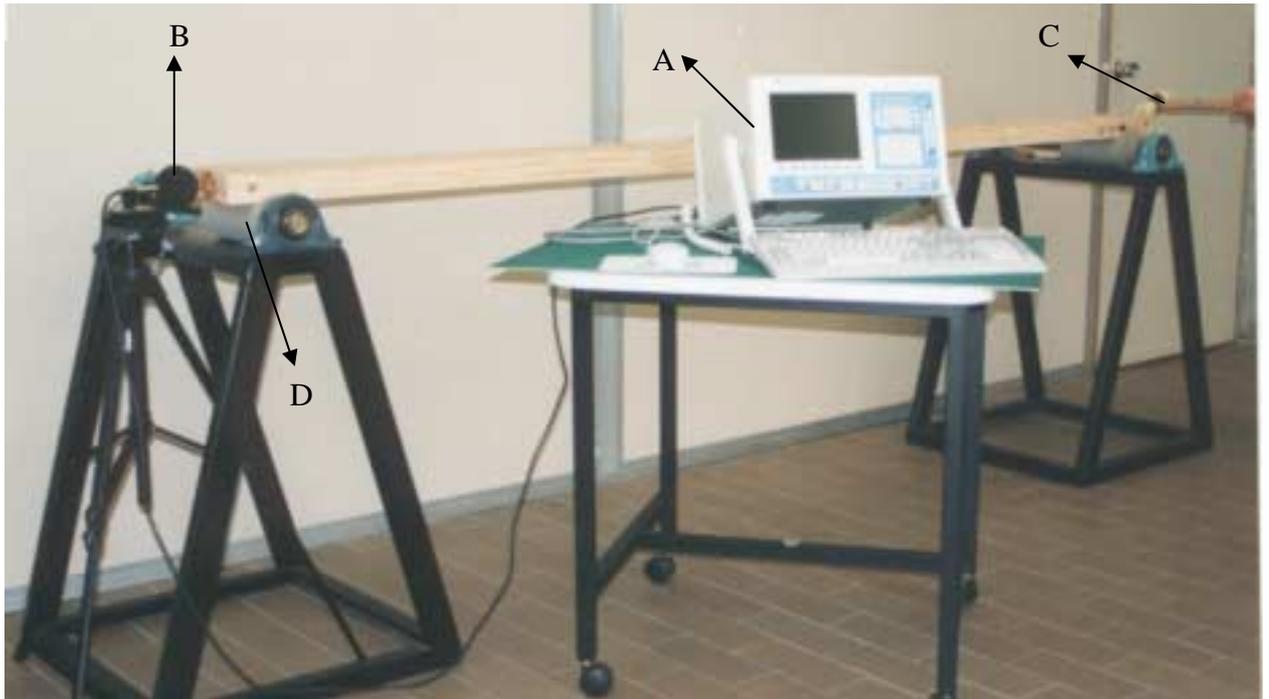


Foto N°2. Donde: A⇒ FFT Analyzer; B⇒ Micrófono; C⇒ Martillo, D⇒ Poliuretano

El cálculo del MOE se realiza de la siguiente manera:

$$f-l = (n / 2 * L) * (E_{f-l} * g/\rho)^{1/2}$$

donde : E_{f-l} = MOE por vibración longitudinal

L = largo de la madera

f-l = frecuencia de la vibración longitudinal

g = constante de aceleración gravitacional

n = n° de modo = 1

ρ = densidad $\Rightarrow \rho = w / (l*b*h)$ donde $\Rightarrow w$: peso de la madera

l : largo de la madera

b : ancho de la madera

h : altura

2.3.3. Vibración Transversal.

Dicho método es similar al anterior ya que se utiliza el mismo equipo (FFT Analyzer conectado a un micrófono). En este caso el golpe se realiza transversalmente a la tabla.

El cálculo del MOE se realiza de la siguiente manera:

$$f-t = y_n * (\pi/2) * (E_{ft} * I * g / (\rho * A) * L^4)^{1/2}$$

donde : E_{ft} = MOE por vibración transversal

L = largo de la madera

f-t = frecuencia de la vibración transversal

g = constante de aceleración gravitacional

ρ = densidad aparente

A = área de la sección transversal

I = momento de inercia. $I = b * h^3/12$ (para piezas cuadradas), donde $\Rightarrow b$: ancho
 h : altura

$$y_n = (n+1/2)^2 \quad (n=1)$$

2.3.4. Fakopp.

El equipo para ensayos no-destructivos FAKOPP, mide el tiempo de propagación de una onda inducida por un impacto, en recorrer la distancia entre dos transductores. El nombre Fakopp proviene de la combinación de dos palabras Húngaras: “fa” y “kopp” que significan árbol y golpear. Es un equipo de origen húngaro, fabricado por la empresa ALNUS Bt.

El test consiste en los siguientes pasos:

\Rightarrow Medición de las dimensiones y del peso de la tabla.

\Rightarrow Clavar los sensores en los extremos de las tablas y conectarlos al equipo.

\Rightarrow Efectuar un golpe en el transductor de inicio “start”. El tiempo de propagación (en microsegundos) se lee inmediatamente en la pantalla.

\Rightarrow Cálculo de la velocidad y evaluación del resultado.

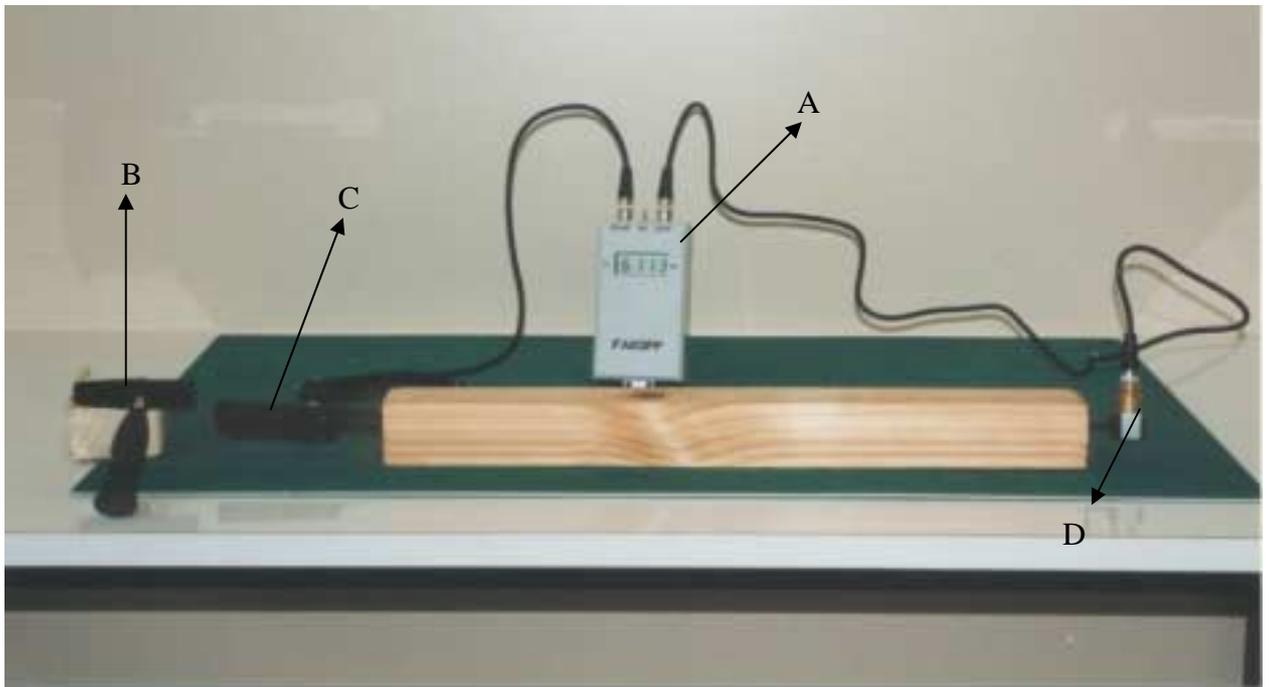


Foto N°3. Donde: A \Rightarrow Fakopp, B \Rightarrow Martillo, C \Rightarrow Transductor de inicio, D \Rightarrow Receptor.

El Módulo de Elasticidad (MOE) se calcula de la siguiente manera:

$$1/t_{-sw} = (E_{t-sw} * g/\rho)^{1/2}$$

donde:

E_{t-sw} : MOE por propagación de onda de impact.

t_{-sw} : tiempo de propagación de la onda por unidad de distancia recorrida

g : constante de aceleración gravitacional

ρ : densidad $\Rightarrow \rho = w / (l*b*h)$ donde $\Rightarrow w$: peso de la madera

l : largo de la madera

b : ancho de la madera

h : altura

2.3.5. Sylvatest.

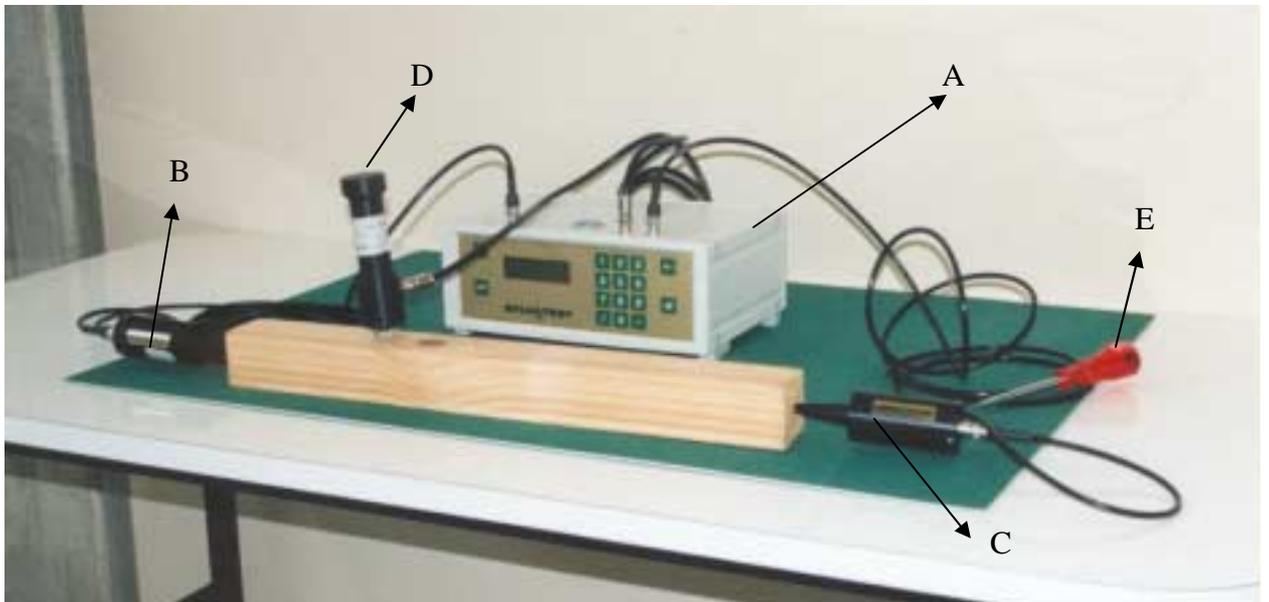


Foto N°4. Donde: A \Rightarrow Sylvatest, B \Rightarrow “Sender”, C \Rightarrow “Receiver”, D \Rightarrow Medidor de Temperatura y Contenido de Humedad, E \Rightarrow Perforador.

El Sylvatest es un equipo que permite a través del ultrasonido, la clasificación de la madera según sus propiedades mecánicas. Es de origen Suizo y fue desarrollado por IBOIS (Instituto Federal de Tecnología de Suiza).

Este equipo tiene tres cables de prueba (ver Foto N°4). Dos de las salidas consisten en transductores piezoeléctricos, donde uno genera la onda (“sender”) y el otro recibe la onda transmitida (“receiver”). La tercer salida (entre las dos anteriores) proporciona mediciones simultáneas de contenido de humedad y temperatura de la madera. Empleando el microprocesador se pueden realizar las mediciones, y los distintos parámetros (especie, tipo de sección y largo de la tabla) se pueden seleccionar con mucha facilidad.

El proceso de ultrasonido se basa en el principio de la relación física entre la velocidad de propagación de una onda de ultrasonido en la madera y las propiedades mecánicas de la madera en sí misma. Por otra parte, como la velocidad de propagación depende del contenido de humedad y la temperatura de la madera, estos factores también son medidos por el equipo.

El instrumento calcula y proporciona la categoría de resistencia de la tabla ensayada, proporciona un valor promedio del Módulo de Elasticidad y sugiere un valor de resistencia a la flexión.

El Módulo de Elasticidad (MOE) se calcula de la siguiente manera:

$$1/t_{-uw} = (E_{t_{-uw}} * g/\rho)^{1/2}$$

donde:

$E_{t_{-uw}}$: MOE por propagación de onda de ultrasonido

t_{-uw} : tiempo de propagación de la onda de ultrasonido por unidad de distancia recorrida

g : constante de aceleración gravitacional

ρ : densidad $\Rightarrow \rho = w / (l*b*h)$ donde $\Rightarrow w$: masa de la madera

l : largo de la madera

b : ancho de la madera

h : altura

2.3.6. Pundit.

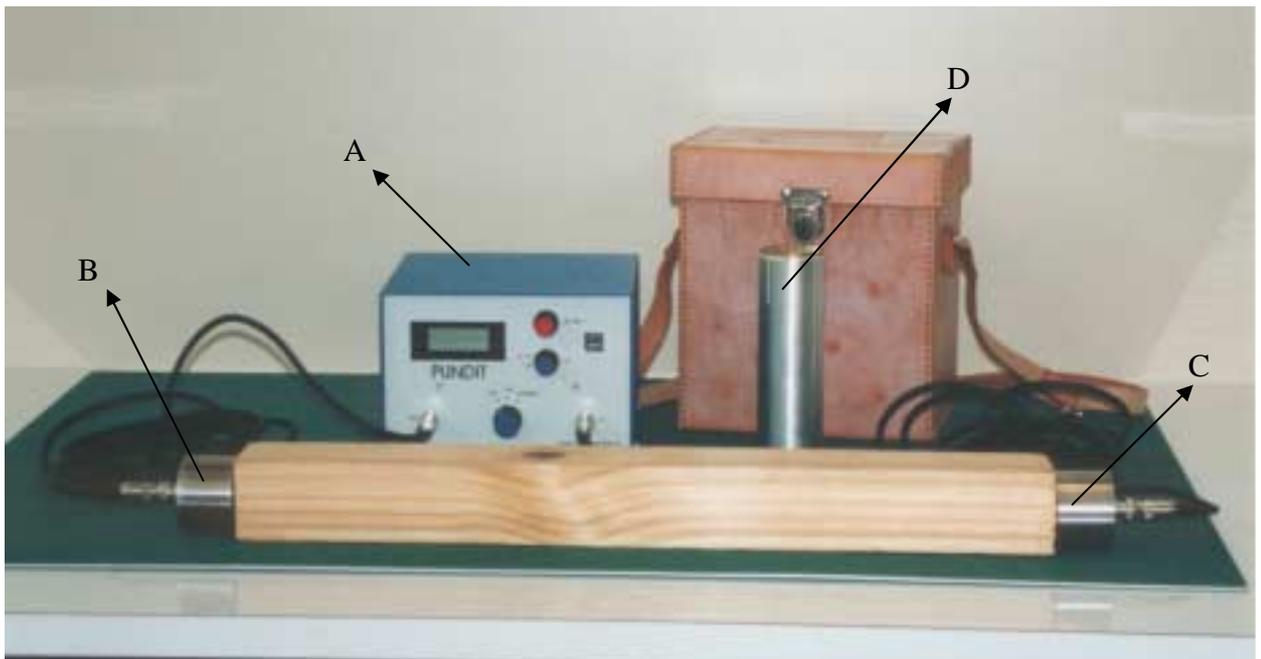


Foto N° 5. Donde: A⇒ Pundit, B⇒ Transductor de inicio, C⇒ Transductor de llegada, D⇒ Calibrador.

Este equipo genera impulsos de ultrasonido de baja frecuencia y mide el tiempo que tarda en recorrer la distancia entre los dos transductores. Es de origen Inglés, fabricado por C.N.S. Electronics Ltd.

El equipo ha sido diseñado para que sea totalmente portátil, fácil de operar y con un alto grado de precisión y estabilidad.

La velocidad con que impulsos de ultrasonido viajan a través de un material sólido dependen de la densidad y de las propiedades elásticas de ese material.

La calidad de ciertos materiales a veces está relacionada a su rigidez elástica, es por eso que la medición de la velocidad de un impulso de ultrasonido en ciertos materiales puede ser usada para indicar la calidad del mismo, así como para determinar sus propiedades elásticas.

Se debe medir la distancia que los impulsos deberán recorrer a través de la madera para luego determinar la velocidad con la siguiente fórmula:

Velocidad del impulso = Distancia recorrida / Tiempo

Tanto la distancia como el tiempo se deben medir con una precisión del $\pm 1\%$.

El método de velocidad de impulso ha demostrado que proporciona medias confiables para la estimación de resistencias en maderas y ha sido usado para ensayar diferentes tipos de productos forestales.

El Módulo de Elasticidad (MOE) se calcula de la siguiente manera:

$$1/t_{-uw} = (E_{t_{-uw}} * g/\rho)^{1/2}$$

donde:

$E_{t_{-uw}}$: MOE por propagación de onda de ultrasonido

t_{-uw} : tiempo de propagación de la onda de ultrasonido por unidad de distancia recorrida

g : constante de aceleración gravitacional

ρ : densidad $\Rightarrow \rho = w / (l*b*h)$ donde \Rightarrow w : peso de la madera

l : largo de la madera

b : ancho de la madera

h : altura

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se analizarán los resultados experimentales obtenidos para contenido de humedad en el momento del ensayo de flexión estática. También se discutirán los resultados de módulo de elasticidad obtenidos a través de los seis métodos utilizados sobre probetas de tamaño real de *Pinus taeda*.

3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD.

El contenido de humedad de las tablas se tomó en el momento de realizado el ensayo con un xilohigrómetro MOCO modelo HM530. Se tomaron dos medidas por tabla y se calculó el promedio. Dichos valores se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla N°1: Contenido de humedad (CH) en el momento del ensayo de las 50 tablas.

N° de probeta					CH (%)	N° de probeta					CH (%)	N° de probeta					CH (%)
1	2	1	A		23	1	1	1	B		27	1	2	2	C		28
1	3	1	A		21	1	1	2	B		29	1	3	2	C		30
2	3	1	A		28	1	4	1	B		24	1	4	2	C		30
2	4	1	A		24	2	2	1	B		24	1	5	2	C		29
3	3	1	A		21	2	5	1	B		28	1	5	1	C		28
6	2	1	A		26	3	2	2	B		25	1	6	1	C		23
6	3	1	A		25	3	2	1	B		24	2	2	2	C		27
7	2	1	A		27	3	4	2	B		24	2	3	2	C		28
8	3	1	A		27	3	4	1	B		25	2	4	2	C		28
11	2	1	A		21	7	1	1	B		28	2	5	2	C		22
12	3	1	A		19	7	3	2	B		25	3	1	1	C		26
13	2	1	A		21	7	3	1	B		27	3	3	2	C		26
Promedio					24	8	2	1	B		21	3	5	1	C		28
Desviación Std					3,0	11	1	1	B		27	6	1	1	C		24
Coef. Variación.					13	11	3	1	B		20	6	4	1	C		21
n					12	12	2	1	B		22	7	2	2	C		29
						12	4	1	B		18	7	4	1	C		22
						Promedio					25	8	1	1	C		25
						Desviación Std					3,0	8	4	1	C		26
						Coef. Variación					12	11	1	1	C		24
						n					17	13	1	1	C		21
						Promedio					26	Promedio					26
						Desviación Std					3,0	Desviación Std					3,0
						Coef. Variación					12	Coef. Variación					12
						n					17	n					21

3.2. COMPARACIÓN DE LOS SEIS DIFERENTES MÉTODOS NO-DESTRUCTIVOS.

Para poder comparar los resultados, se calculó el coeficiente de correlación entre los valores de MOE obtenidos utilizando el método de flexión estática con pesas (E_b) y con los otros cinco métodos. Los resultados se pueden observar en la siguientes cinco gráficas de la figura N°2:

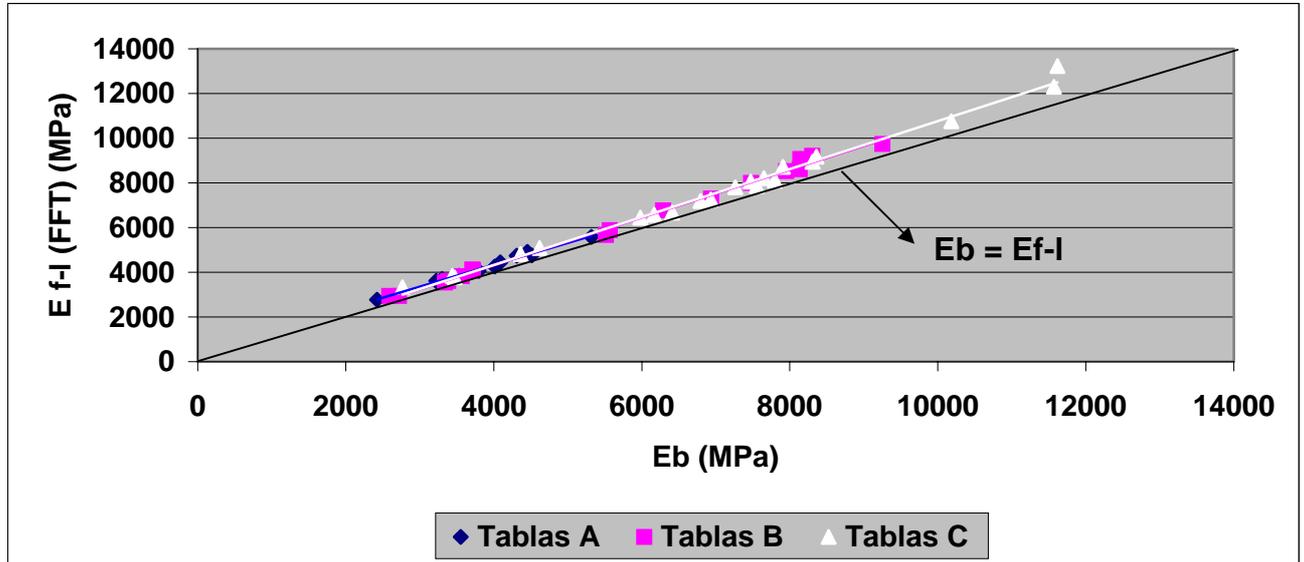


Figura N°2 ⇒ Gráfica A: FFT Analyzer (Vibración Longitudinal).

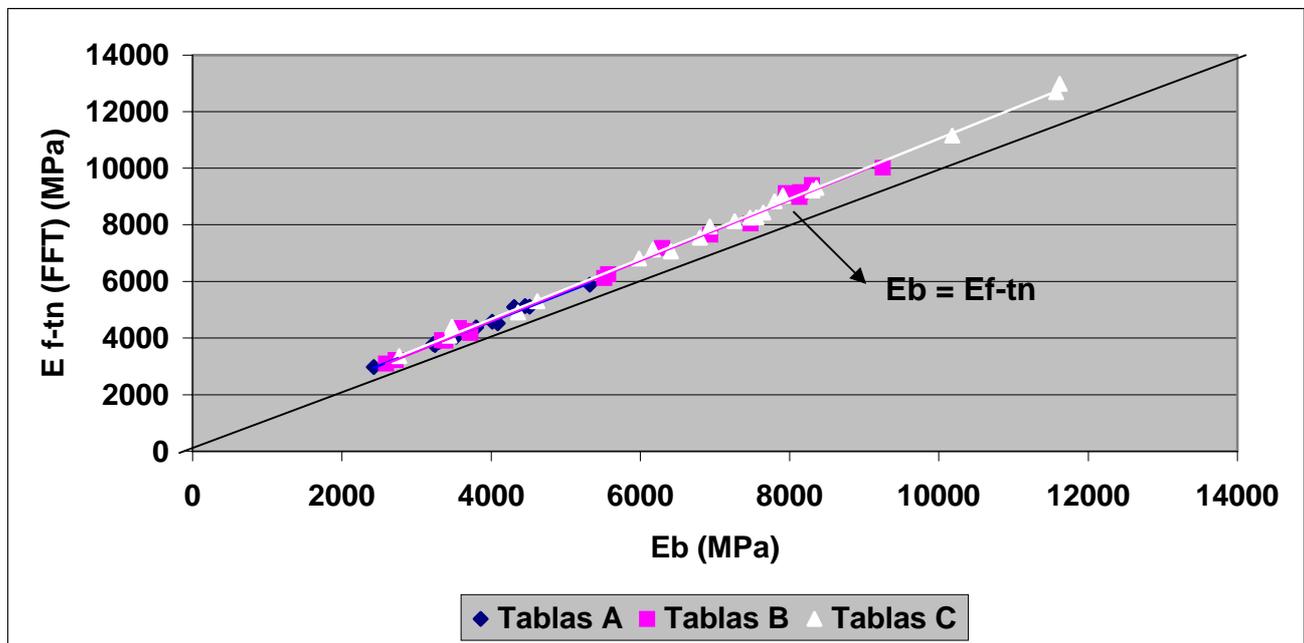


Figura N°2 ⇒ Gráfica B: FFT Analyzer (Vibración Transversal).

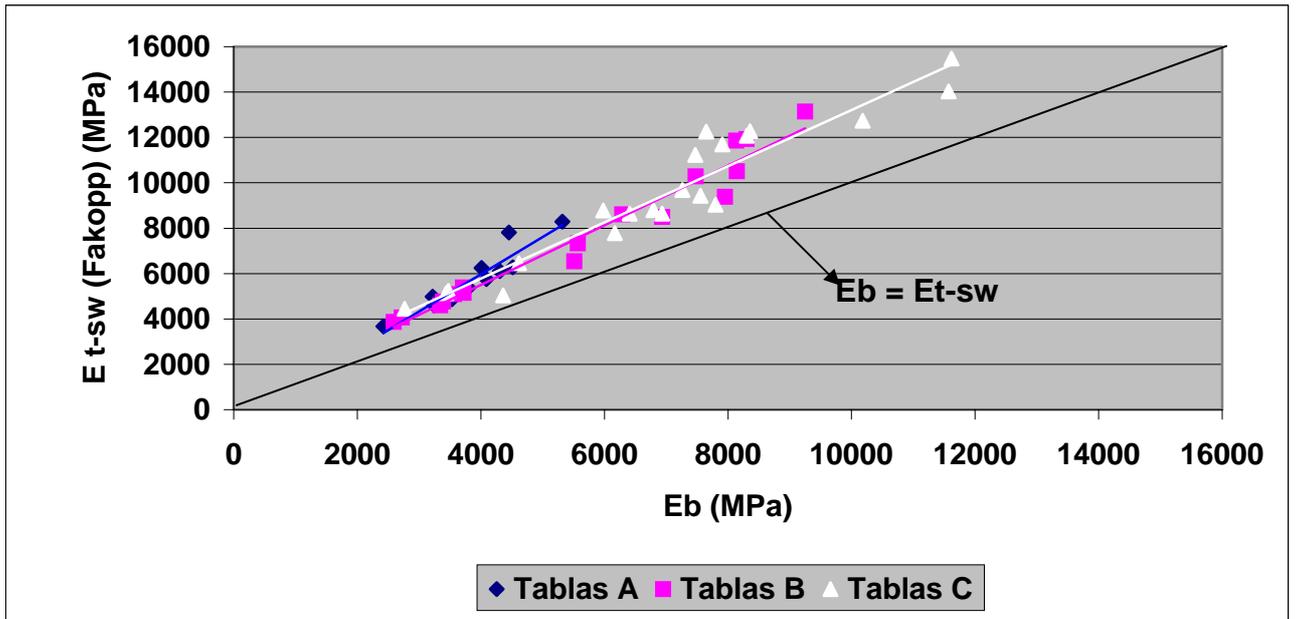


Figura N°2 ⇨ Gráfica C: Fakopp.

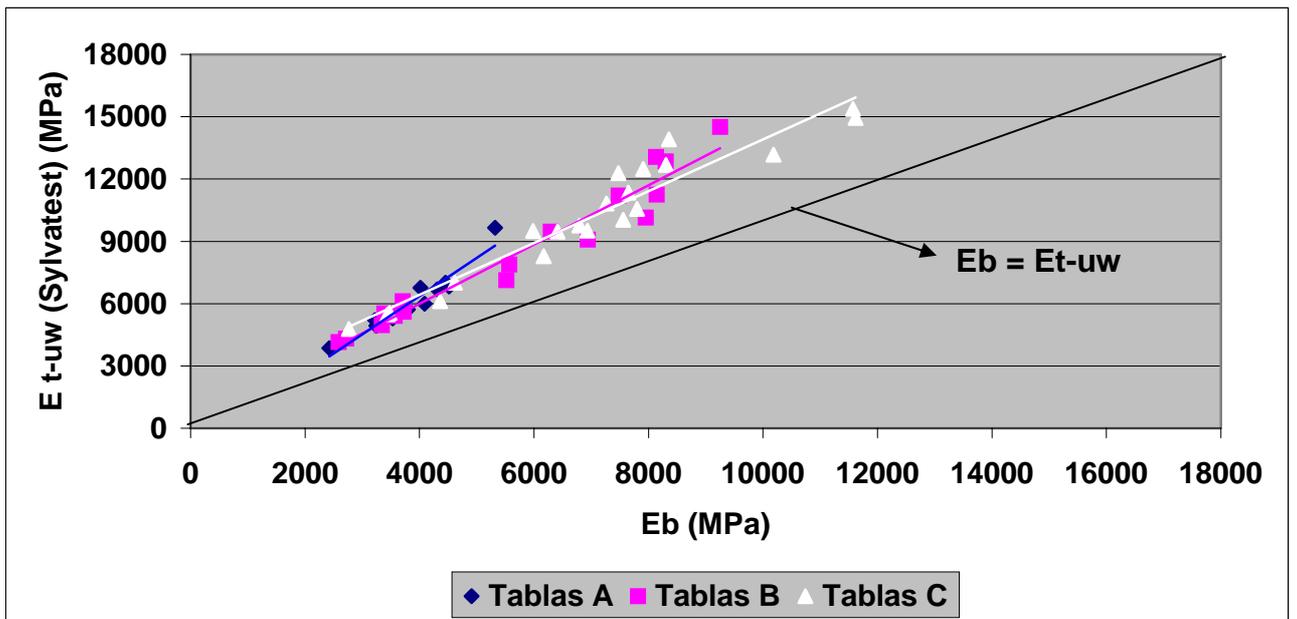


Figura N°2 ⇨ Gráfica D: Sylvatest.

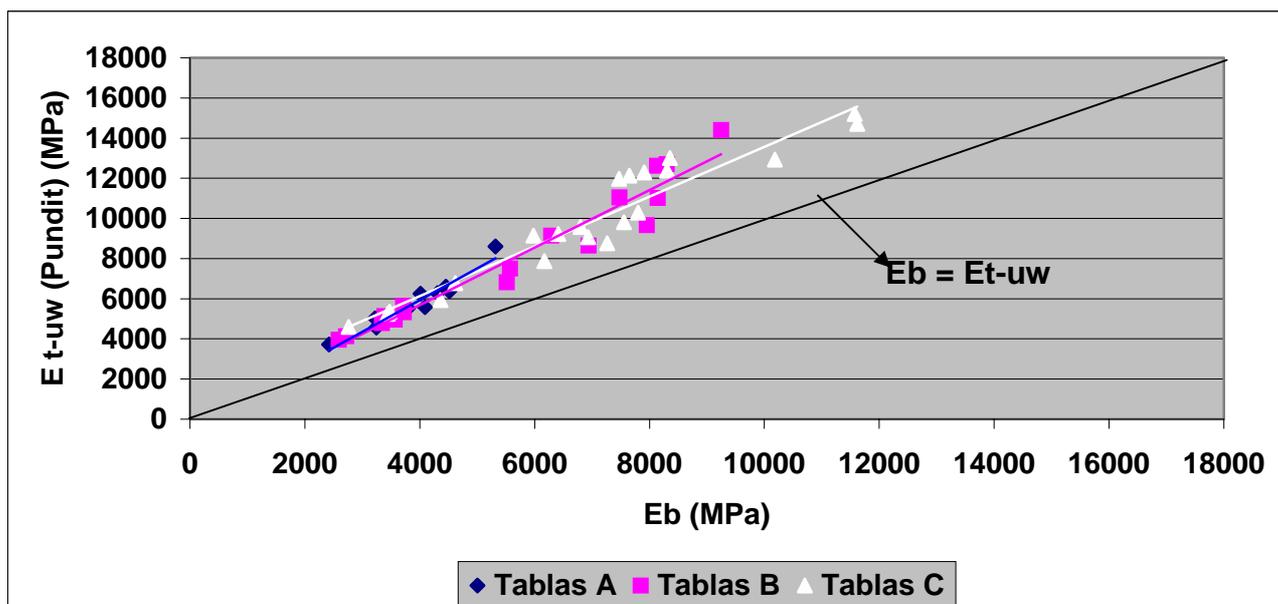


Figura N°2 ⇨ Gráfica E: Pundit

Figura N°2: Correlación del MOE medido a través del método de Flexión Estática (Pesas). (Eb) y el MOE obtenido con los otros cinco métodos utilizados. Influencia de la posición en la troza (A, B y C)

Los resultados individuales del MOE de cada tabla se pueden observar en el anexo 1, mientras que los coeficientes de correlación del MOE calculado para los cinco equipos con respecto a la flexión estática (Pesas) se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla N°2: Coeficiente de correlación del MOE calculado para los 5 equipos con respecto a la flexión estática. Influencia de la ubicación en la troza.

EQUIPO	MUESTRA	n	COEF. CORR.
FFT (Vib. Trans)	A	12	0,994
	B	17	0,998
	C	21	0,999
FFT (Vib. Long)	A	12	0,995
	B	17	0,998
	C	21	0,996
Fakopp	A	12	0,941
	B	17	0,980
	C	21	0,958
Sylvatest	A	12	0,961
	B	17	0,976
	C	21	0,963
Pundit	A	12	0,967
	B	17	0,973
	C	21	0,958

A modo de ejemplo, se puede observar a partir de la figura N°2 y la tabla N°2, el alto coeficiente de correlación que se encontró entre el MOE obtenido por el método de flexión (Pesas) y el MOE calculado a través del FFT (Vibración longitudinal y Vibración transversal).

Del estudio de los coeficientes de correlación para los cinco casos considerados se puede deducir que estos dos métodos mencionados son los más apropiados para la estimación de las propiedades de flexión estática de las tablas.

En los otros tres métodos utilizados (Pundit, Fakopp y Sylvatest), por más que los coeficientes de correlación fueron levemente inferiores que para los métodos anteriores (FFT Analyzer), igualmente se obtuvieron coeficientes altos y positivos.

Es importante observar también, que los valores de las correlaciones entre flexión estática (Pesas) y el FFT (Vibración longitudinal y Vibración transversal), son muy similares entre las distintas clasificaciones de tablas (A, B y C).

Como conclusión de la evaluación de las correlaciones encontradas, los seis métodos utilizados fueron apropiados para estimar las propiedades de flexión en tablas de tamaño real, encontrándose pocas diferencias entre ellos. A pesar de esto, desde el punto de vista del uso práctico, el método de vibración longitudinal es el más apropiado para la estimación del MOE. La razón de esto es que dicho método tiene alta reproducibilidad, es simple y no requiere poner en contacto con la madera ni clavos ni sensores. Además de las ventajas anteriormente dichas, el método por vibración longitudinal, es el método más apropiado para utilizar en tablas más cortas que las ensayadas en este estudio (Nagao H., 1991).

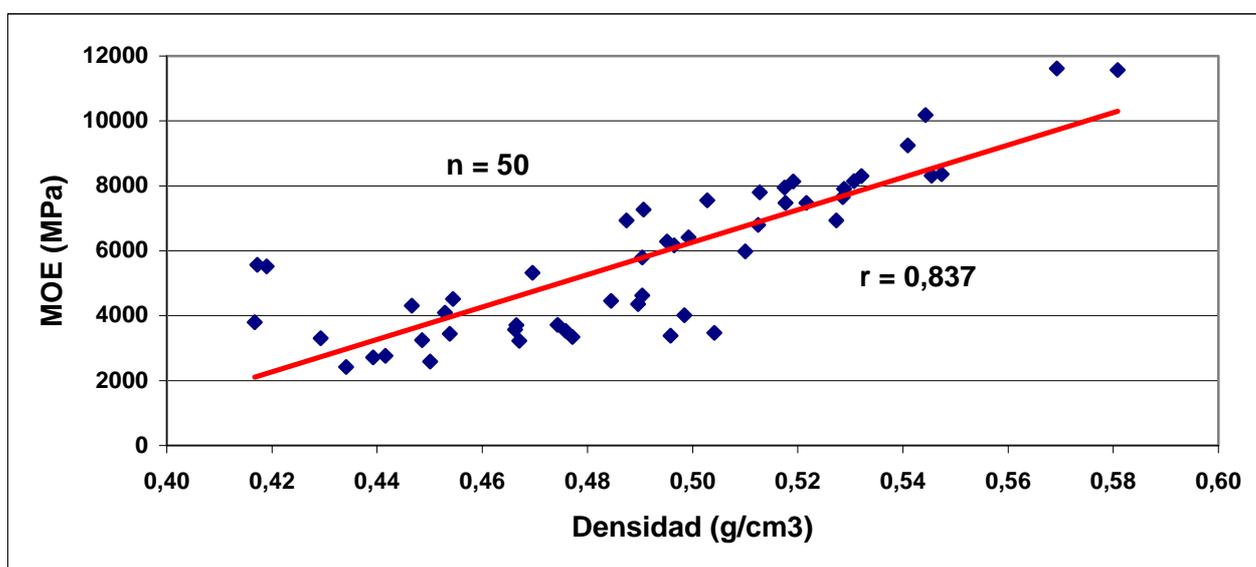
3.3. RELACIÓN ENTRE EL MOE Y LA DENSIDAD.

De todas las propiedades de la madera, la densidad es la más significativa para determinar el uso final que se le pueda dar. Tiene una influencia considerable en el rendimiento pulpable, las propiedades físicas, químicas y mecánicas. La relación general entre resistencia y densidad de la madera está bien establecida para muchas especies, sin embargo esta relación no ha sido aún estudiada en plantaciones de *Pinus taeda* en Uruguay.

La relación entre la densidad al momento de realizar el ensayo no-destructivo y el MOE por el método de flexión estática (Pesas) se puede observar en la gráfica N°3. El contenido de humedad de cada una de las tablas ensayadas se observa en la tabla N°1.

El coeficiente de correlación calculado mostró ser alto y positivo ($r = 0,837$, $n = 50$). El contenido de humedad de las tablas osciló entre 18 y 30 % con una media de 25 %.

La densidad se calculó con el contenido de humedad existente en el momento del ensayo, aplicando la fórmula: Densidad: Masa / Volumen.



Gráfica N° 3: Correlación entre Densidad (g/cm3) y MOE (Método de Pesas)

3.4. MOE DE MADERA JUVENIL Y MADERA ADULTA.

3.4.1. Variación del MOE desde médula a corteza.

En general, la calidad de la madera adulta es superior a la de la madera juvenil, o sea ocurre un incremento gradual o rápido de la calidad de la madera desde la médula hasta las zonas externas del fuste. Este cambio está influenciado por la especie y por las condiciones de crecimiento. Para el caso de los árboles ensayados, la transición de una madera a otra ocurrió entre los anillos 8 y 15 (distancia promedio de la médula de entre 11 y 16 centímetros aproximadamente). Una vez que el árbol comienza a generar madera adulta, la calidad de ésta se mantiene casi constante, encontrándose en esta madera las características genéticas originales de cada árbol. Igualmente, la tendencia de la variación del MOE entre árboles presenta diferentes modelos y valores. Los resultados obtenidos de tablas de 9 árboles diferentes presentaron una gran variación, por lo tanto la variación del MOE en los 9 árboles ensayados se discutirá en este capítulo.

Las tablas A ensayadas, que incluían médula, presentaron valores de MOE menores que las tablas B y C. La importante diferencia encontrada principalmente entre las tablas A y C se debe fundamentalmente al mayor porcentaje de madera juvenil presente en las tablas A.

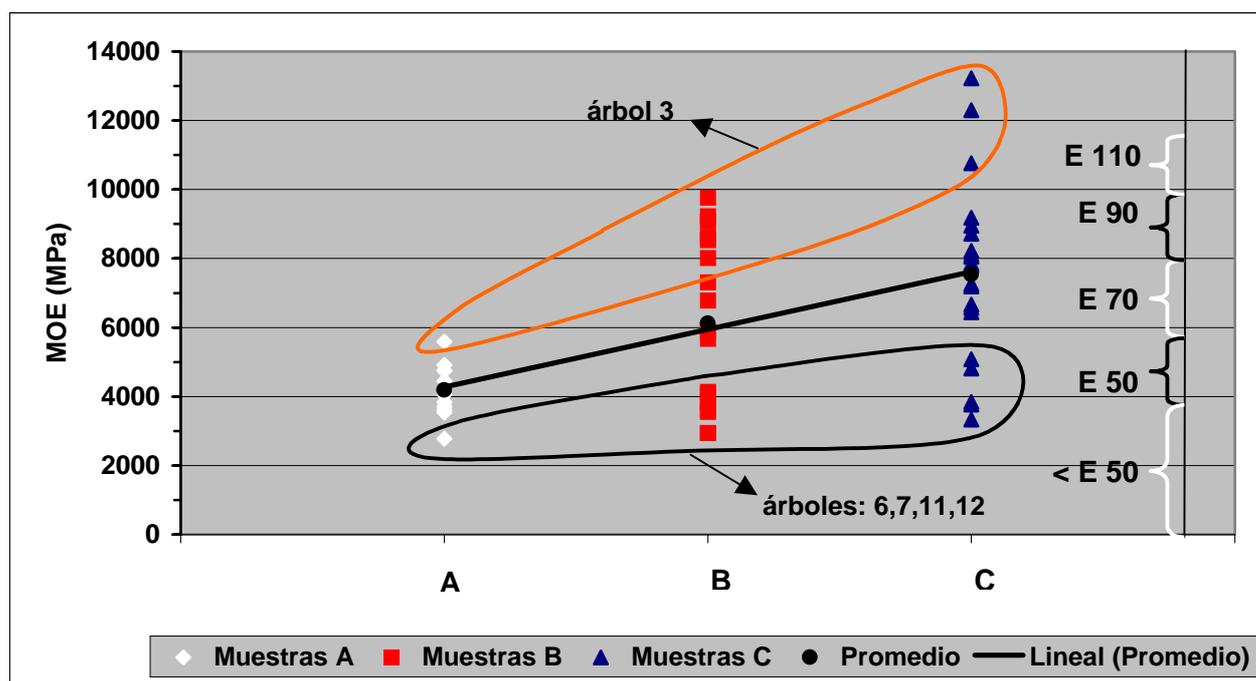
Es importante también observar, que la desviación standard del MOE obtenido para las muestras A fue menor que para las otras dos categorías. Esto se debe a que como se mencionó anteriormente, la transición entre madera juvenil y adulta se observó (estimada a partir de mediciones de largo de traqueidas) entre los 8-15 años, lo que implica que la mayoría de las tablas A presentaban un muy alto porcentaje de madera juvenil, mientras que las tablas B y C el porcentaje era muy variable.

Los valores de MOE promedio, máximo, mínimo y desvío estándar obtenidos del ensayo de flexión estática (Pesas) para las diferentes categorías A, B y C de los 9 árboles ensayados se observan en la siguiente tabla :

Tabla N° 3: Valores obtenidos de MOE (MPa) por flexión estática (Pesas) según ubicación de las tablas en las trozas.

	CATEGORÍAS DE TABLAS		
	A	B	C
n	12	17	21
Media (MPa)	4190	6120	7530
Máximo (MPa)	5590	9760	13220
Mínimo (MPa)	2780	2940	3330
Desviación Std.	758	2450	2600
Coef. Variación (%)	18,1	40,0	34,5

3.4.2. Variación del MOE entre los 9 árboles ensayados.



Gráfica N°4: Valores de MOE (Pesas) según su ubicación respecto a la médula.

Observando la gráfica N° 4, se puede decir que el MOE de los árboles N° 6, 7, 11 y 12 no tuvo un incremento importante desde la médula a la corteza, especialmente esta tendencia se observa en los árboles N° 7, 11 y 12. Por ejemplo, los valores medios de MOE (MPa) para las tablas A, B y C del árbol N°11 son 2420, 2650 y 2760 respectivamente, donde la diferencia entre la media de las tablas A y C es de solamente 300 (MPa). Por otra parte, la media del MOE del árbol N°3, para las tablas A, B y C, fue de 5320, 8290 y 10500 (MPa) respectivamente, siendo la diferencia entre A y C de 5180 MPa.

Teniendo en cuenta que en este estudio, los árboles seleccionados fueron solamente 9 y que además se muestrearon de un solo lugar, no se puede llegar a una conclusión definitiva. Igualmente, considerando que cerca del 50% de los 9 árboles ensayados mostraron un valor de MOE menor que el esperado, se puede decir que las plantaciones de *Pinus taeda* presentan una gran variación entre árboles. Se deberá investigar más y acumular más información de las plantaciones, y se deberá ensayar e inspeccionar la madera según sus usos finales, especialmente para madera estructural sometida a estándares de calidad.

4. CLASIFICACIÓN DE P. TAEDA BASADA EN EL MOE SEGÚN NORMAS JAS.

Con los resultados obtenidos de los seis diferentes métodos no-destructivos aplicados en tablas de *Pinus taeda* cultivados en Uruguay, se observó que existe una buena correlación entre ellos, especialmente entre el método de flexión estática (Pesas) y el FFT Analyzer (Vib. longitudinal y transversal). Por lo tanto, se realizó una clasificación por propiedades mecánicas a partir del módulo de elasticidad obtenido por los métodos no-destructivos. En este caso, la clasificación se realizó con los resultados obtenidos con el FFT Analyzer (Vib. Long.).

Los resultados se clasificaron según las normas JAS (Japan Agricultural Standard) para madera estructural y se observan en la siguiente tabla:

Tabla N° 4: Clasificación de las tablas según normas JAS.

Clasificación por JAS.	MOE (10 ³ kgf/cm ²)	MOE (MPa)	N° de Árbol y categoría de tabla
Valores menores que E 50			7(B,C),11(B,C),otras A
E 50	40-60	3920-5880	3(A),6(C),8(C),12(B),13(A)
E 70	60-80	5880-7850	1(B,C),2(B,C),13(C)
E 90	80-100	7850-9810	3(B)
E 110	100-120	9810-11770	3(C)
E 130	120-140	11770-13730	
E 150	140-160	13730-15690	

De los resultados obtenidos se puede decir que los *Pinus taeda* ensayados pertenecen a categorías desde menor que E 50 hasta E 110.

Generalmente, las tablas ensayadas que incluían médula (categoría A) presentaron un valor de MOE muy bajo, con excepción de los árboles N° 3 y 13. Por otra parte, los árboles N° 7 y 11 mostraron un MOE muy bajo a pesar de que las tablas eran categoría B y C. En las tablas que presentaban médula (A), se observó claramente que no alcanzaron un valor de MOE suficientemente alto como para ser usadas con fines estructurales. Esto mismo se puede decir para las tablas que se encuentren muy cerca a la médula (algunas de la categoría B).

Es muy importante también aclarar que se encontró una muy alta variación entre diferentes árboles. Algunos árboles presentaron un MOE muy alto (ej: árbol N°3) mientras que otros presentaron MOE muy bajos (ej: árbol N°11). Esto demuestra que existe la posibilidad de aumentar la calidad de la madera de *Pinus taeda* mediante mejoramiento genético y manejo forestal.

La variación entre árboles y la variación entre las diferentes categorías (A, B y C) se puede observar en la gráfica N° 4 y a su vez como esta variación influye en la categorización según normas JAS.

5.CONCLUSIONES.

De la estimación del módulo de elasticidad de las tablas de *Pinus taeda* se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1) Los métodos de evaluación del módulo de elasticidad que fueron comparados con el método de la flexión estática (Pesas), presentaron todos ellos coeficientes de correlación (del MOE) altos y positivos.
- 2) El FFT Analyzer (Vibración Longitudinal) se presentó como el método más apropiado para la estimación del MOE, ya que presenta alta correlación, alta reproducibilidad, es simple y no requiere poner en contacto con la madera ni clavos ni sensores.
- 3) Se observó también un coeficiente de correlación alto y positivo entre el MOE y la densidad calculada en el momento de realizado el ensayo.
- 4) La clasificación de las tablas en tres diferentes categorías (A, B y C) demostró la variación del MOE según la ubicación de la tabla dentro de la troza. Es por esto que es muy importante tener en cuenta dónde ocurre la transición entre la madera juvenil y la madera adulta, siendo para este ensayo entre los anillos 8 y 12, ya que las propiedades mecánicas varían mucho entre los dos tipos de madera.
- 5) Mediante la clasificación según las normas JAS de las 50 tablas estudiadas, se determinó que estas abarcan cinco categorías diferentes (<E50, E50, E70, E90 y E110).
- 6) Según la clasificación por las normas JAS, se puede decir que las tablas que presenten alto porcentaje de madera juvenil (tablas A) no podrán ser usadas con fines estructurales. El uso final de las tablas B y C dependerá del porcentaje de madera juvenil que ellas presenten.
- 7) El hecho de que se hayan encontrado árboles con valores de MOE muy superiores que los de más, demuestra que es posible aumentar la calidad de la madera de *Pinus taeda* mediante mejoramiento genético y manejo forestal.
- 8) Se observó una muy alta variación del MOE entre los 9 árboles estudiados, lo que implica que se deberá investigar más y acumular más información de las plantaciones de *Pinus taeda* cultivados en Uruguay.
- 9) Los seis métodos de evaluación utilizados en este estudio resultaron ser simples, rápidos y confiables. Por esto, y por la practicidad de su uso, estos métodos pueden ser recomendados para su uso en la industria forestal.

6. BIBLIOGRAFÍA.

1. NAKAI, T.; TANAKA, T. / Non-destructive test by frequency of full-size timber for grading, *Buliding Research and Practice*. 1989, 17 (1).
2. NAGAO, H.; NAKAI, T.; TANAKA, T. / Non destructive evaluation of bending and tensile strength by longitudinal and transverse vibration of lumber, *Eighth International Nondestructive Testing of Wood Symposium, Proceedings*, Washintong State Univ. And USDA Forest Products Lab., 1991: 23-25.
3. KOMATSU, K. / Strength characteristics of sugi wood as a structural material. Proceedings of the symposium for promoting sugi wood as a structural material. *Timber Research Group Meeting*, Japan Wood Research Society, 1998: 9-20.
4. NAKAI, T. / Quality of planted trees. Breeding strength of sugi squares. *Wood Industry*, 1984, 39 (11): 552-556. (Japanese).
5. Agriculture Handbook 72; *Wood Handbook*; Wood as an engineering material, USDA, 1999.
6. WATANABE, H.; TSUTSUMI, J.; MATSUMOTO, T; OHTA S. / Study on juvenile wood, *Japan Wood Research Society*, 1964, 10 (4): 125-130.
7. OHTA, S.; WATANABE, H. / Mechanical properties of juvenile wood- Relationship between dynamic modulus of elasticity and fibril angle of Sugi stems (*Cryptomeria japonica*), *Scientific Report of Experimental Forest of Kyushu University*, 1968, (22): 105-116.
8. OHTA, S.; WATANABE, H. / Mechanical properties of juvenile wood in the stem of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), *Japan wood Research Society*, 1968, 14 (5).
9. COWN, D. / Variation in tracheid dimensions in the stem of a 26-year-old radiata pine tree, *APPITA* 28, 1975, (28): 237-245.
10. BAMBER, K.; BURLEY, J. / *The wood properties of Radiata pine*, Commonwealth Agricultural Bureaux, Australia 1983.
11. OHTA, S. / The observations of tree ring structure by soft X-ray densitometry(2)- The effects of wind direction on growth and some properties of *Pinus pinaster*, *Japan Wood Research Society*, 1979, 25: 561-566.
12. WATANABE, H.; TSUTSUMI, J.; KOJIMA, K. / Study on juvenile wood(1), *Japan Wood Research Society*, 1963, 9 (6): 225.

7. ANEXO.

ANEXO 1:

Módulo de elasticidad (MPa) calculado con los seis métodos utilizados para las 50 tablas ensayadas y contenido de humedad (%) de dichas tablas en el momento de realizado el ensayo:

N° de Tabla				MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS DIFERENTES EQUIPOS (MPa)						
				Flex. Estática (Pesas)	Pundi t	Sylvates t	Fakop p	FFT Analyzer		Contenido de Humedad (%)
								Vib. Long.	Vib. Trans.	
1	2	1	A	4454	6594	7013	7814	4913	5124	23
1	3	1	A	3222	5019	5209	4970	3606	3771	21
1	1	1	B	7951	9664	10150	9388	8527	9122	27
1	1	2	B	8142	11018	11245	10512	9065	9154	29
1	4	1	B	3708	5641	6111	5384	4130	4250	24
1	2	2	C	7798	10280	10560	9035	8107	8825	28
1	3	2	C	8307	12375	12689	12073	8944	9208	30
1	4	2	C	7648	12132	11343	12264	8215	8428	30
1	5	1	C	7471	11976	12285	11235	8051	8248	28
1	5	2	C	7909	12298	12478	11700	8721	9028	29
1	6	1	C	10183	12931	13172	12742	10761	11154	23
2	3	1	A	4516	6383	6831	6278	4752	5107	28
2	4	1	A	4013	6250	6758	6250	4255	4581	24
2	2	1	B	6937	8657	9078	8496	7307	7653	24
2	5	1	B	6290	9138	9469	8606	6776	7182	28
2	2	2	C	7555	9807	10036	9432	7860	8259	27
2	3	2	C	6409	9224	9465	8634	6665	7052	28
2	4	2	C	6795	9574	9763	8791	7190	7543	28
2	5	2	C	5982	9142	9500	8777	6439	6806	22
3	3	1	A	5320	8610	9647	8284	5589	5884	21
3	2	1	B	8133	12627	13064	11858	8618	8985	24
3	2	2	B	8301	12705	12847	11940	9214	9404	25
3	4	2	B	9249	14402	14515	13138	9748	10021	24
3	4	1	B	7477	11052	11207	10287	8004	8044	25
3	1	1	C	11616	14715	14945	15482	13223	12980	26
3	3	2	C	8358	13003	13912	12268	9177	9304	26
3	5	1	C	11571	15198	15376	14035	12299	12693	28
6	2	1	A	4088	5584	5998	5756	4449	4517	26
6	3	1	A	3302	4857	5061	4708	3706	3871	25
6	1	1	C	6169	7868	8287	7780	6572	7122	24
6	4	1	C	3440	5244	5494	5143	3841	4083	21

**MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS
DIFERENTES EQUIPOS (MPa)**

N° de Tabla				Flex. Estática (Pesas)	Pundit	Sylvatest	Fakopp	FFT Analyzer		Contenido de Humedad (%)
								Vib. Long.	Vib. Trans.	
7	2	1	A	3244	4567	4937	4599	3539	3753	27
7	1	1	B	3342	4779	4972	4598	3546	3925	28
7	3	2	B	3383	5133	5530	4767	3618	3909	25
7	3	1	B	3566	4954	5405	5098	3826	4354	27
7	2	2	C	3471	5351	5546	5227	3763	4389	29
7	4	1	C	4360	5935	6120	5044	4814	4904	22
8	3	1	A	3530	4953	5282	4862	3842	4046	27
8	2	1	B	3721	5321	5616	5145	4079	4182	21
8	1	1	C	6933	9058	9508	8640	7258	7936	25
8	4	1	C	4619	6771	7013	6456	5084	5298	26
11	2	1	A	2423	3722	3859	3667	2775	2979	21
11	1	1	B	2588	3960	4144	3861	2943	3092	27
11	3	1	B	2717	4134	4323	4071	2941	3222	20
11	1	1	C	2765	4599	4787	4453	3334	3357	24
12	3	1	A	3797	5521	5714	5380	4053	4368	19
12	2	1	B	5514	6828	7135	6541	5664	6117	22
12	4	1	B	5568	7507	7887	7327	5888	6260	18
13	2	1	A	4309	6277	6684	6111	4744	5092	21
13	1	1	C	7265	8760	10814	9675	7803	8131	21
n				50	50	50	50	50	50	50
MEDIA (MPa)				5789	8242	8576	7972	6245	6534	25
MAX (MPa)				11616	15198	15376	15482	13223	12980	30
Min (MPa)				2423	3722	3859	3667	2775	2979	18
Desv. Standard				2395	3268	3269	3106	2566	2573	3
Coef. de Variación (%)				41,4	39,6	38,1	39,0	41,1	39,4	12,3

Laboratorio Tecnológico del Uruguay

Sector Productos Forestales

Av. Italia 6201- CP. 11500-Montevideo, Uruguay
Tel. (+598-2)601.3724 Int. 321 Fax:(+598-2)601.8554
e-mail: rdecas@latu.org.uy